主論文の要旨

Evaluation of the differences in pressure applied to the vessel wall by different types of balloon remodeling microcatheters in an experimental model

（各種バルーンリモデリングマイクロカテーテルが
血管壁へ加える圧力の違いについての実験的検討）

名古屋大学大学院医学系研究科　総合医学専攻
脳神経病態制御学講座　脳神経外科学分野
（指導：齋藤 竜太　教授）
池澤 瑞香

【緒言】

バルーンリモデリングマイクロカテーテル（BRMC）は主に広頚の脳動脈瘤に対するコイル塞栓術に使用され、動脈瘤の頚部を覆うことでコイルが母血管へ逸脱するのを防止する。BRMC には compliant balloon（CB）とより柔軟な super compliant balloon（SCB）がある。CB は主に側壁動脈瘤に使用され、SCB はバルーンを突出させることで CB では困難な分岐部動脈瘤に対する塞栓も可能である。ただしバルーンを突出させる場合には、母血管へ圧力がかかり解離や破裂などの血管損傷を引き起こす可能性がある。現在複数の BRMC が選択可能であり、より柔軟性の高いバルーンを選択することで合併症のリスクを減少させる事が可能と考えられる。しかし、異なるバルーン間におけるコンプライアンスと圧力の違いについては明らかにされていない。この研究の目的は、各種バルーンを血管壁の穴から突出させた際に母血管壁に加わる圧力の違いについて検討することである。

【方法】

6 種類の血管モデルを作成した。内腔 3mm のシリコンチューブに直径 3mm の穴を開けたモデルを vascular model A とし、さらに直線と 120 度に屈曲したモデルを作成した。屈曲モデルでは穴は大弯側の頂点に作成した。また、穴の直径を 4mm に変えた血管（vascular model B）と血管の内腔を 4mm に変えた血管（vascular model C）を別に用意しそれぞれに直線と屈曲のモデルを作成した。血管モデルの穴から各バルーンを 1mm 突出させた際に血管壁にかかる圧力を計測した。さらに vascular model A と B の直線モデルでは 2mm の高さまで突出させた際の圧力も測定した。圧力の測定には Codman ICP MicroSensor（Codman & Shurtleff Inc., Raynham, MA）を使用した。BRMC は HyperForm（バルーン直径 4× 有効長 7 mm、Covidien/ev3, Irvine, CA）、SHOURYU SR（4 × 10 mm; Kaneka Medics, Osaka, Japan）、SHOURYU HR（4 × 7 mm; Kaneka Medics）、TransForm C（4 × 10 mm; Stryker Neurovascular, Fremont, CA）、TransForm SC（4 × 7 mm; Stryker Neurovascular）、Scepter C（4 × 10 mm; MicroVention, Inc., Tustin, CA）、Scepter XC（4 × 11 mm; MicroVention, Inc.）の 7 種類を各 5 本ずつ用意した。血管モデル A において CB 間、SCB 間でそれぞれ Kruskal-Wallis 検定を用いて多群間の比較を行い、差が認められた場合には Steel-Dwass 法で各 BRMC 間の多重比較を行った。さらに血管モデル間の圧力差については各 BRMC の測定圧力の中央値を線グラフで視覚化しバルーン間の全体的な圧力差を評価した。また血管モデル間の圧力の変化を比較するために Wilcoxon 符号順位検定を行い、その後血管モデル B と C でそれぞれ Kruskal-Wallis 検定を使用して各グループにおけるバルーン間の圧力差を比較した。差が認められた場合には Steel-Dwass 法で各バルーン間の多重比較を行った。

【結果】

血管モデル A

直線モデル：

SCB 間の多重比較検討では、1mm と 2mm 突出させた場合共に各バルーン間で圧力に有意差を認め（共に p=0.001）、HyperForm の圧力が最も低かった（1mm: 中央値 132 mmHg、2mm: 258 mmHg）。

CB 間の多重比較検討では、1mm と 2mm 突出させた場合共に各バルーン間で圧力に有意差を認め（1mm: p=0.007、2mm: p=0.006）、SHOURYU SR の圧力が最も低かった（1mm: 240 mmHg、2mm: 546 mmHg）。

屈曲モデル：

SCB 間の多重比較検討では各バルーン間の圧力に有意差を認め（p=0.002）、HyperForm の圧力が最も低かった（254 mmHg）。

CB 間の多重比較検討では各バルーン間の圧力に有意差を認め（p=0.005）、Scepter C の圧力が最も低かった（374 mmHg）。

屈曲モデルでの各バルーンの圧力はそれぞれ直線モデルで 2mm 突出させた際の圧力と近かったが、Scepter XC/C では直線モデルで 2mm 突出させた場合の圧力よりも低かった。

血管モデル B

血管モデル B では血管モデル A と比較して直線モデル、屈曲モデル共に全てのバルーンで圧力が低下した。

直線モデル：

SCB では 1mm 突出した場合には全てのバルーンで血管壁にはほとんど圧力がかからなかった。2mm 突出した場合、多重比較検討では各バルーン間の圧力に有意差を認め（p<0.001）、HyperForm の圧力が最も低かった（143 mmHg）。

CB 間の多重比較検討では 1mm と 2mm 突出させた場合共に各バルーン間で圧力に有意差を認め（1mm: p=0.004、p=0.009）、Scepter C の圧力が最も低かった（1mm: 130 mmHg、2mm: 437 mmHg）。

屈曲モデル：

SCB 間の多重比較検討では各バルーン間の圧力に有意差を認め（p=0.001）、HyperForm の圧力が最も低かった（170 mmHg）。

CB 間の多重比較検討では各バルーン間の圧力に有意差を認め（p=0.009）、Scepter C の圧力が最も低かった（251 mmHg）。

血管モデル C

血管モデル C では血管モデル A と比較して全てのバルーンで圧力が上昇した。

直線モデル：

SCB 間の多重比較検討では各バルーン間の圧力に有意差を認め（p=0.005）、HyperForm の圧力が最も低かった（169 mmHg）。

CB 間の多重比較検討では各バルーン間の圧力に差を認めなかった。

屈曲モデル：

SHOURYU HR、SHOURYU SR、TransForm C では全てのバルーンが破裂したため圧力の測定ができなかった。破裂したバルーンの拡張には最大注入量以上の注入が必要であり、バルーンの破裂は過膨張に関連していると考えられた。SCB、CB 共に多重比較検討では各バルーンの圧力に差を認めなかった。

【考察】

分岐部動脈瘤を治療する際には分岐血管を保護するためにバルーンを動脈瘤頚部で母血管径以上に突出させることがある。突出させた場合には動脈瘤頚部にも圧力が加わるため血管損傷のリスクがあると考えられる。柔軟性が高いバルーンを選択する方が血管壁にかかる圧力を最小化でき血管損傷のリスクの低減が期待できる。しかし各 BRMC のバルーンが血管壁へ加える圧力について直接比較した検討はほとんどない。今回の検討では、バルーンを突出させた際に血管壁にかかる圧力が BRMC の種類により違いがある事が判明し、さらに血管の形状（直線と屈曲）や穴のサイズ、血管の直径が圧力に影響を及ぼす事が判明した。HyperForm は今回行った実験における全ての条件下で血管壁へかかる圧力が他のバルーンと比較して最も低かった。また屈曲血管の大弯側では直線血管で同じ高さに突出させるよりも圧力が高く、穴が大きいほど圧力は低くなる傾向があった。さらにバルーンの直径より小さい血管でバルーンを突出させた場合の方が圧力は上昇しにくかった。

この研究にはいくつかの制限がある。バルーンの本数は限られており有効長や直径が異なるバルーンについては評価していない。さらに実験は in vitro で実施されており、生体では血管の弾性や血流、バルーンと血管壁との摩擦などの影響が加わるため今回の結果とは異なる可能性がある。しかし圧力測定方法や合併症を考慮すると生体内で今回と同様の実験を行うことは困難である。また実臨床ではバルーンの柔軟性に加えて病変へのカテーテル誘導性、利用可能なガイドワイヤーの太さ、管腔構造の違いについても BRMC を選択する際の重要な要素となる。BRMC の選択にはこれらの条件についても考慮する必要がある。

【結語】

バルーンが血管壁へ加える圧力は BRMC の種類により異なっていた。さらに血管の形状と直径、穴のサイズが結果に影響した。これらの調査結果は BRMC の選択に役立つ。